

SONDERDRUCK
aus

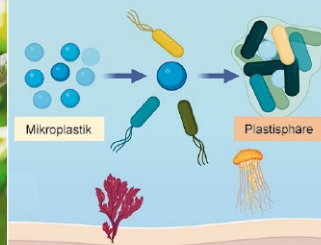
2 | 2022

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



ZOOLOGIE
Monogamie bei
Springaffen



MIKROBIOLOGIE
Bakterien als
Plastikmüllabfuhr

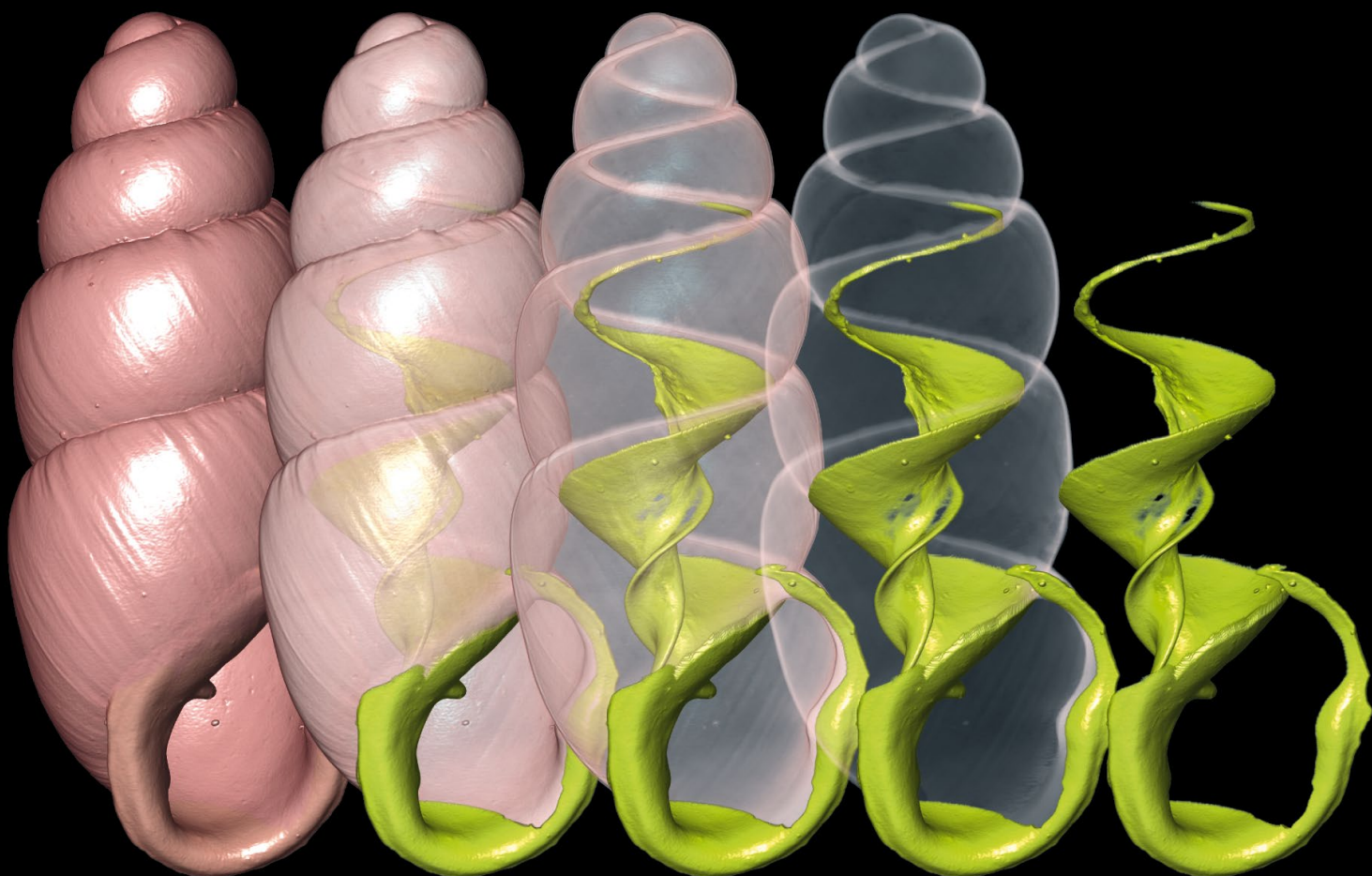


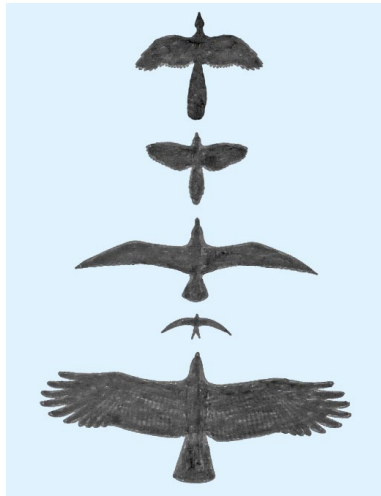
SCHULE
Die Immuno-Viren-
Show

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Mit Röntgen
in die dritte Dimension**





Flügelformen als Ergebnis der Evolution

Rund, spitz, gespalten

HEINRICH EDER | WERNER NACHTIGALL

ABB. 1 Entwicklung der Flügelformen. Von oben nach unten: Flügel des Urvogels *Archaeopteryx*, vor ca. 150 Mio. Jahren: kurze gedrungene Form (nach [3]), Elster: kurzer Flügel, angenähert elliptischer Flügelabschluss, Möwe: langer Flügel mit Zuspitzung und Rückwärtspeilung des Außenflügels, Mauersegler: großer Pfeilwinkel des Flügelendes mit Zuspitzung, Adler: Aufspaltung zur Schwungfederkaskade [2]. Die Größenverhältnisse entsprechen der Natur.

In der Natur begegnet man den unterschiedlichsten Flügelformen. Ihre spezielle Konfiguration kann zum Beispiel Vorteile bei der Mobilität und im Energieverbrauch mit sich bringen. Der hervorsteckende Unterschied besteht in der Ausprägung der Schlankheit des Flügels und der Flügelspitzen. Flügelformen stellen eine Anpasstheit an Lebensraum, Jagdverhalten und Reichweite dar. So haben zum Beispiel Überraschungsjäger wie Sperber und Habicht, die im Unterholz jagen, kurze Flügel. Möwen, die sich im freien Luftraum bewegen, haben im Vergleich zur Körperlänge spitze, gestreckte Flügel. Die wichtigsten Grundformen der heute in der Natur vorkommenden Flügel sowie des Urvogels *Archaeopteryx* sind in Abbildung 1 exemplarisch zusammengestellt (z. B. [1–3]). Spitze Flügelenden findet man bereits bei den Flugsauriern, deren Flügel mit Häuten bespannt waren. Die spitzen Flügelenden bei den Federflüglern (heutige Vögel) haben sich jedoch erst durch entsprechende evolutiv bedingte/selektionsbedingte Formgebung der Handschwingen gebildet, denn die Urvögel besaßen noch kurze, gerundete Flügelabschlüsse.

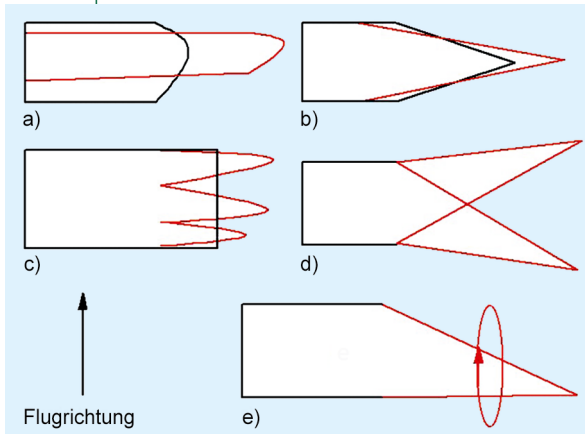
Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 171 erklärt.

Flügel besitzen im Wesentlichen drei Widerstandsanteile: einen, der mit der Form des Flügelquerschnittes (Profil) zusammenhängt (Druckwiderstand), einen, der mit der Beschaffenheit der Oberfläche zusammenhängt (Reibungswiderstand) und den induzierten Widerstand (Kasten S. 164 und [4]). Letzterer hängt eng mit der Verteilung des Auftriebs über der Flügelspannweite und damit der Flügelumrissform zusammen. Da der induzierte Widerstand meist den Hauptanteil des vom Vogel erfahrenen Gesamtwiderstandes bildet, setzen sich im Laufe der Evolution Flügelformen durch, bei denen dieser minimiert ist. Dies ist auch der Grund, warum wir heute ganz bestimmte Grundformen von Flügelumrissen vorfinden. Grundsätzlich ist jede Auftriebserzeugung infolge des Druckunterschiedes zwischen Flügelober- und -unterseite und der daraus folgenden Ausgleichsströmung mit einer Wirbelbildung verbunden. Die hierdurch am Flügel abwärts gerichtete Strömungskomponente ist die Ursache des induzierten Widerstandes. Flügel, die besonders hohen Auftrieb erzeugen, besitzen demzufolge einen hohen induzierten Widerstand. So beträgt dieser beim Storch 75 Prozent des Gesamtwiderstandes, während er bei den Meeresseglern wie dem Albatros etwa 50 Prozent des Gesamtwiderstandes ausmacht (nach Daten von [2, 5]).

Da der Vogelflug die technische Entwicklung der Fliegerei zumindest in den Anfängen stark beeinflusst hat (siehe z. B. [6]), finden sich die natürlichen Flügelformen ansatzweise auch bei Flugzeugen wieder. Ingenieure haben sehr schnell herausgefunden, dass die von Flugsauriern und Vögeln entwickelten Flügelformen einen geringeren Luftwiderstand besitzen.

Zuspitzung verringert den Widerstand

Der Flügelumriss und besonders die Ausprägung der Spitze am Flügelende haben Einfluss auf den induzierten Widerstand und damit auf den Gesamtwiderstand. Das Flügel-

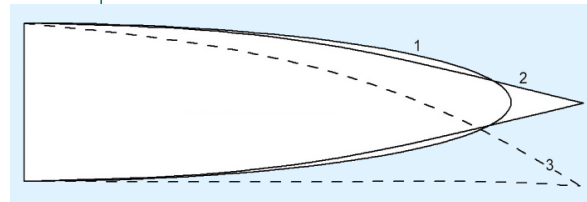
ABB. 2 | ENTWICKLUNGSFORMEN VON VOGELFLÜGELN


Strukturelle Ausprägungen des Vogelflügels, die die Flugeigenschaften beeinflussen können, sind a) Erhöhung der Schlankheit (Streckung) des Gesamtflügels, b) Erhöhung der Zuspitzung des Handflügels, c) Aufspaltung der Handschwingen, d) Vorwärts-/Rückwärtspeilung des Handflügels, e) Verdrehung (Schränkung) des Handflügels.

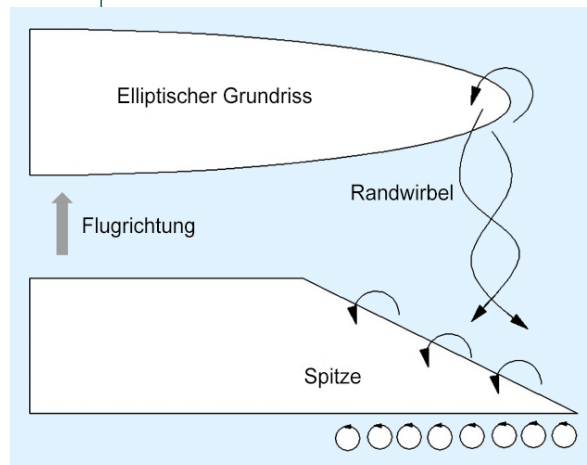
ende wird bei allen Vögeln von den äußeren Handschwingen gebildet. Die unterschiedliche Längen- und Breitenstaffelung war das entscheidende Werkzeug der Evolution, um unterschiedliche Formen hervorzubringen. Grundsätzlich können die folgenden geometrischen Parameter des Flügelumrisses beeinflusst werden (Abbildung 2): Verhältnis Flügellänge zu Breite (► Streckung), Zuspitzung und Pfeilung. Dazu kommt eine Verdrehung des Handflügels, die sogenannte Schränkung. Für die Zuspitzung des Flügelendes im Laufe der Evolution gibt es vermutlich einen gewichtigen Selektionsvorteil: die Verringerung des induzierten Widerstands, die wiederum einen Mobilitätsvorteil mit sich bringt.

In der Aerodynamik gilt die elliptische Auftriebsverteilung als diejenige mit dem geringsten induzierten Widerstand, sofern die Spannweite limitiert ist. Der zugehörige Flügel hat etwa Ellipsenform. Ist die Spannweite nicht limitiert, kann unter Konstanzhaltung der für Manövrier- und Festigkeitseigenschaften wichtigen Größen ► Wurzelbiegemoment und ► Massenträgheitsmoment (siehe Kasten S. 167) der induzierte Widerstand unter das Niveau des elliptischen Flügels gesenkt werden [7]. Die Evolution hat das Problem bereits seit Millionen von Jahren gelöst; das Ergebnis lautet: Zuspitzung des Flügelendes statt eines elliptischen oder kreisrunden Abschlusses. Mit der größeren Spannweite erfasst der Flügel einen größeren Luftquerschnitt und arbeitet dadurch effizienter, weil der induzierte Widerstand sinkt.

Das Massenträgheitsmoment des Flügels beeinflusst die Manövrierfähigkeit und ist dafür verantwortlich, wie schnell ein Vogel einen Richtungswechsel einleiten kann. Je größer das Trägheitsmoment, desto länger dauert das Einleiten einer Kurve. Das kann z. B. die Fähigkeiten bei

ABB. 3 | ZUSPITZUNG VERRINGERT WIDERSTAND


Im dargestellten Beispiel haben die Flügel 1, 2 und 3 das gleiche Wurzelbiegemoment bzw. Massenträgheitsmoment und die gleiche Grundfläche. Die Spannweite b vergrößert sich gegenüber der Ellipse (Flügel 1) infolge der Zuspitzung um 14%, die Streckung Δ um 29%. Gleichzeitig nimmt der induzierte Widerstand F_{Wi} um rund 10% ab. Die Rückwärtspeilung (Flügel 3) führt zu einer weiteren Reduzierung des induzierten Widerstandes.

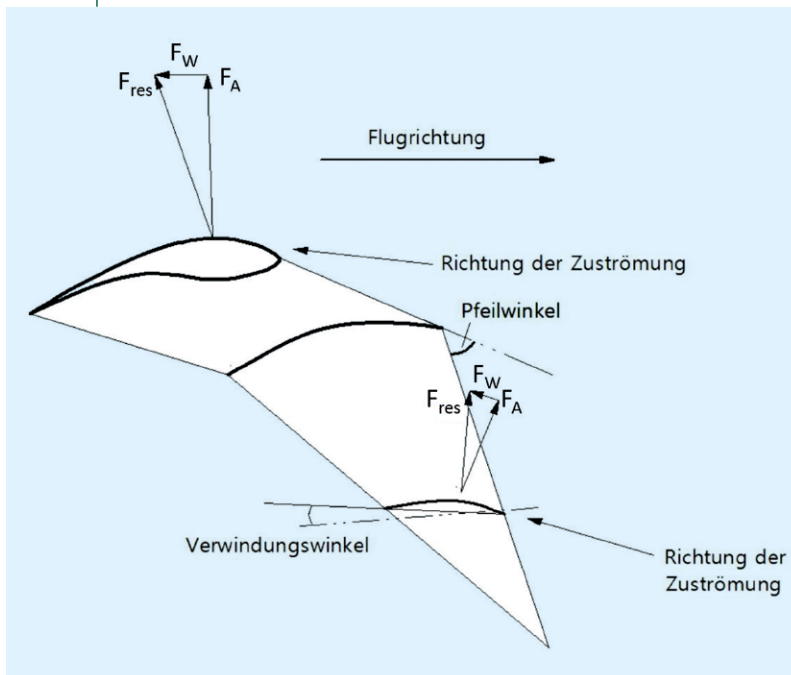
ABB. 4 | RANDWIRBEL VERSCHIEDENER FLÜGELFORMEN


Der elliptische Flügel erzeugt am Flügelende einen kräftigen Randwirbel. Der spitz auslaufende, zurückgepeilte Flügel (untere Grafik) wird von einer über die gesamte Handfläche ausgedehnten Wirbelschicht gefolgt, die schneller zerfällt als der konzentrierte Randwirbel des elliptischen Flügels [8]. Die Rückwirkung auf den Innenflügel, d. h. der dort erzeugte Abwind, ist im zweiten Fall geringer, was den induzierten Widerstand senkt.

IN KÜRZE

- Die Evolution hat bestimmte **charakteristische Flügelformen** hervorgebracht.
- Sie zielen meist auf die **Reduzierung des induzierten Widerstandes** ab.
- Erst die Widerstandsreduzierung ermöglicht **größere Reichweiten** und Migration.
- **Seevögel** besitzen schlanke, zugespitzte Flügel, **Landsegler** breite Flügel mit aufgefächerten Handschwingen.
- **Aerodynamische Berechnungen** bestätigen die Ergebnisse der Evolution hinsichtlich der Optimierung der Flügelformen.

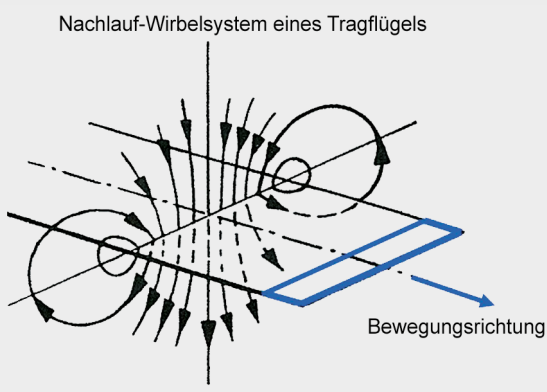
ABB. 5 | EFFEKTE DER PFEILUNG



Die Pfeilung führt zusammen mit der Zuspitzung zu einem steileren Anströmwinkel der Luft an der Flügelspitze. Der Außenflügel wird aufgrund der dort wirkenden Auftriebskraft F_A gegenüber dem Innenflügel verdreht, so dass Strömungsablösungen vermieden werden. Infolge der Verdrehung ergibt sich ein Gesamtkraftvektor F_{res} , der nach vorne gerichtet ist und einen Vortrieb erzeugt.

DER INDUZIERTER WIDERSTAND F_{wi}

Die sich am Tragflügel aufbauende Druckdifferenz (Oberseite: Unterdruck, Unterseite: Überdruck) führt zu Querströmungen mit Wirbelbildung. Am Flügelende beginnt infolge des dortigen Druckausgleichs ein kräftiger Wirbel (Randwirbel) und rollt sich hinter dem Flügel zusammen mit den Wirbelfäden des Innenflügels auf. Das Wirbelfeld im Nachlauf des Flügels (Abbildung) wirkt durch Induktion auf den davor liegenden Flügel und erzeugt dort vertikal gerichteten Abwind. Daraus resultiert der induzierte Widerstand F_{wi} (Erläuterung siehe auch [4]). In der Elektrodynamik entspricht dieses Phänomen der Selbstinduktion einer Spule.



der Jagd erheblich beeinflussen. Das Biegemoment an der Flügelwurzel ist für die Bruchfestigkeit entscheidend. Im Bereich der Flügelwurzel (Humerus-Knochen) hat es den höchsten Wert. Das Wurzelbiegemoment hängt von der Verteilung des Auftriebs entlang der Spannweite ab, das Massenträgheitsmoment von der Verteilung der Masse entlang der Spannweite. Da die Verteilung des Auftriebs und die Massenbelegung aus Gründen der Statik einen ähnlichen Verlauf entlang der Spannweite haben, kann man beides zusammen näherungsweise zu einem Optimierungskriterium zusammenfassen.

Im Laufe der Evolution kann nun beobachtet werden, dass sich die Spannweite infolge Zuspitzung so vergrößert hat, dass Massenträgheitsmoment und Wurzelbiegemoment nicht zunehmen (Abbildung 3). Auch die Flügelfläche bzw. der Gesamtauftrieb kann dabei konstant gehalten werden. Ein Optimum liegt nach [7] vor, wenn die Spannweite infolge Zuspitzung um rund 20 Prozent erhöht wird. Dabei sinkt der induzierte Widerstand um etwa 12 Prozent. Die „Materialkosten“ zur Erlangung dieses Widerstandsvorteils sind praktisch gleich Null, da nicht mehr Baumaterial verbraucht wird als beim elliptischen Flügel.

Einfluss der Pfeilung

Außer der Zuspitzung hat sich in der Evolution noch ein weiteres Merkmal zur Minimierung des Widerstandes entwickelt: die Rückwärtspeilung des Außenflügels (Abbildung 4). Die infolge Pfeilung und Zuspitzung entstehende Wirbelschicht ist ausgedehnt und zerfällt schneller als der kompakte Randwirbel des elliptischen Flügels. Zimmer [8] hat verschiedene Modellflügel mit Hilfe des Wirbelgitterverfahrens untersucht und kommt zu dem Ergebnis, dass Zuspitzung in Verbindung mit Pfeilung des Außenflügels den geringstmöglichen induzierten Widerstand liefert.

Der nach rückwärts gepfeilte Handflügel reduziert nicht nur den induzierten Widerstand, sondern er verwindet sich infolge der Luftkräfte. Die Verwindung ist notwendig, um Ablösungen der Strömung zu verhindern (Abbildung 5). Die Verwindung ist auch erforderlich, da die Zuströmung der Luft am gepfeilten Flügelende mit steilerem Winkel erfolgt als in der Flügelmitte. Die Verwindung ist vor allem im Abschlag deutlich ausgeprägt, wodurch sich an der Flügelspitze ein nach vorne gerichteter Kraftvektor F_{res} ergibt, der Vortrieb erzeugt. Bei zahlreichen Flugbildern findet man eine deutliche Verwindung des Außenflügels vor allem im Schlagflug. Auch im Gleitflug ist insbesondere bei Kurzflüglern bei hohen Auftriebswerten eine Verwindung des Handflügels beobachtbar (Abbildung 6). Dagegen zeigen z.B. Albatrosse mit ihren lang gestreckten Flügeln keine erkennbare Verwindung (Abbildung 7).

Land- und Meeressegler unter den Vögeln

Die Differenzierung der Flügelenden erfolgte evolutiv im Wesentlichen in zwei Richtungen: Land- und Meeressegler



ABB. 6 Gleitflug einer Küstenseeschwalbe (*Sterna paradisaea*). a) starke Zuspitzung verbunden mit Rückpfeilung des Außenflügels. b) Die Verwindung des Außenflügels wirkt einer Strömungsablösung bei hohem Auftrieb entgegen. Die Küstenseeschwalbe bewältigt die längste Zugstrecke unter den migrierenden Arten von der Arktis zur Antarktis und wieder zurück. Fotos: pjt56@ über Wikimedia Commons und iStock.



ABB. 7 Der Flügel des Wanderalbatros zeigt wegen der hohen Streckung im Bereich der Flügelspitze keine stärkere Verwindung. Foto: CanStock.

[2]. Diese adaptive Aufspaltung bringt Vorteile bei der Nutzung des jeweiligen Lebensraumes [9]. Meeres-Streckenflieger, wie der Wanderalbatros (Abbildung 8), besitzen – bezogen auf ihre Körperlänge – Flügel großer Spannweite mit spitzen, zurückgepfeilten Enden, wobei die Starteigenschaften des Vogels mit der großen Spannweite von über drei Meter problematisch sind und die Flügel-länge schon deswegen an Grenzen stößt. Auch bei migrierenden Kleinvögeln ist die Flügelform abhängig von der Zugentfernung. Fiedler [10] fand bei Mönchsgrasmücken (*Sylvia atricapilla*), dass sich Spannweite, Flügelstreckung und Zuspitzung mit zunehmender Zugstrecke verschiedener Populationen vergrößern.

Landsegler, wie der Storch (Abbildung 9), besitzen breite Flügel mit besonders viel Fläche und vermindern damit die flächenspezifische Belastung. Der Grund: Sie müssen bei der Nutzung der Thermik langsam fliegen und eng kreisen können, denn thermische Aufwinde haben in der Regel eine begrenzte Ausdehnung. Die unterste Ge-



ABB. 8 Wanderalbatros – hier der Laysanalbatros – sind typische Streckenflieger mit langgestreckten spitz nach hinten zulaufenden Flügelen. Foto: iStock.



ABB. 9 Weißstorch (*Ciconia ciconia*) im Nestanflug mit abgespreiztem spitzen Daumenfittich (Alula). Auch die Handschwingen besitzen ausgeprägte Spitzen. Sie stellen für sich jeweils kleine Flügel dar, die ähnlichen Prinzipien unterliegen, wie sie für einen zugespitzten Gesamtflügel gelten. Foto: Heinrich Eder.

schwindigkeit eines Storches beim Thermikkreisen wurde mit nur 6,5 m/s (ca. 23 km/h) gemessen [11]. Mit der Flügelbreite wächst auch der induzierte Widerstand. Hier hält die Natur jedoch einen weiteren Trick bereit: die aufgefächerte Schwungfederkaskade, die den Randwirbel in kleine energiearme Wirbel auflöst [12]. Ein Storchflügel simuliert mit Hilfe der Kaskade einen rund 20 Prozent längeren Flügel, als es der natürlichen Spannweite entspricht – und das ohne Anstieg des Massenträgheitsmomentes und des Biegemomentes! Die Entwicklung der Kaskade stellt also einen Synergismus mit Mehrfacheffekten dar.

Flügelform bei Insekten

Hautflügel (*Hymenoptera*, *Planipennia*) und viele andere Insektenordnungen besitzen meist gerundete bzw. elliptisch geformte Flügelenen (Abbildung 10). Das hat mit ihrer Leichtbauweise zu tun: Eine mit einem verstärkten Rand aus Chitin umgebene Membran mit einer Dicke von wenigen Mikrometern ist mit einzelnen Adern durchzo-

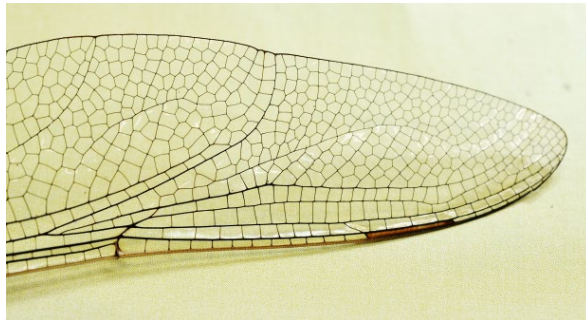


ABB. 10 Flügel der Mosaikjungfer (*Aeshna affinis*) mit elliptisch geformten Enden. Da Reibungs- und Druckwiderstand hier überwiegen, ist die Form des Flügelabschlusses zweitrangig und entspricht vorrangig den mechanischen Erfordernissen (Festigkeit, Formstabilität, Gewicht). Foto: Heinrich Eder.

gen, die die Biegesteifigkeit gewährleisten. Ein Insektenflügel muss verwindungsfähig sein, damit er sich beim Auf- und Abschlag verdrehen kann. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, eine für die Auftriebserzeugung günstige ▶ Kinematik einzustellen. Die Membranbauweise mit einem festen Rand besitzt geringes Gewicht bei hoher Festigkeit. Von der Festigkeitslehre her wissen wir, dass Bogenformen ein Optimum darstellen – man vergleiche die Bogenkonstruktionen im Bauwesen und bei Brücken. Wegen der geringen ▶ Re-Zahl überwiegt der Reibungswiderstand der Luft, so dass die Form des Flügelabschlusses und damit der induzierte Widerstand hier nicht im Vordergrund stehen.

Vielfältige Flügelabschlüsse findet man bei Schmetterlingen. In der Regel besitzt der komplette Flügel eine ▶ Vorwärtspfeilung. Diese erhält man, wenn man die ▶ tragende Linie einzeichnet (Abbildung 11). Einzelne Arten bilden rückwärts gerichtete Fortsätze oder gezackte Flügelenden aus, ohne dass die funktionsmorphologische Bedeutung hier klar ersichtlich wäre (Abbildung 12).



ABB. 11 Kaisermantel (*Argynnis paphia*) mit Vorwärtspfeilung der tragenden Linie bei 25% der Flügeltiefe (die 25%-Linie wird in der Aerodynamik auch tragende Linie bezeichnet, entlang der man sich den Angriffspunkt des Auftriebs vorstellen kann). Foto: Heinrich Eder.

Abstrahierte Flügelformen und ihre Näherung bei Schmetterlingen und Vögeln

Im Folgenden werden die häufigsten Flügelabschlüsse und deren aerodynamische Bedeutung in Form von modellhaften Näherungen besprochen und der induzierte Widerstand berechnet. Die meisten in der Natur vorkommenden Flügelumrisse sind nicht eindeutig den schematisierten Umrissen nach Tabelle 1 zuzuordnen, sondern Mischformen.

Elliptischer Flügelabschluss (Typ A)

Eine elliptische bzw. runde Flügel-Abschlussform findet sich häufig bei Insekten. Die Handschwingen einiger nicht oder wenig wandernder Vögel bilden beim Gleitflug einen mehr oder weniger gerundeten Flügelabschluss (z. B. Spechte, Häher, Elster, Eulen). Diese Vögel müssen zur Nahrungssuche meist keine größeren Entfernungen überwinden. Auch Vögel, die im dichten Bewuchs jagen, besitzen diese Flügelform.

Schmetterlingstyp (Typ B)

Vorwärtspfeilung des Flügels findet man bei den meisten Schmetterlingen (Abbildung 11). Die funktionsmorphologische Bedeutung der Vorwärtspfeilung ist noch unklar. Der Grund könnte eine Vergrößerung der Flügelfläche bei limitierter Spannweite sein. Der vorgepfeilte Flügel ist besonders robust gegenüber Strömungsablösungen an der Flügelspitze, was gerade für den weitgehend verwindungsfreien Abschlag sehr günstig ist. Die Strömung reißt bei dieser Flügelgeometrie bei Überschreitung des Höchstauftriebes im Mittelbereich des Flügels eher ab als außen, d. h. die Fluglage bleibt auch bei sehr hohen Anströmwinden stabil. Zumindest in der Anfangsphase des Aufschlags kann ein Schmetterlingsflügel dagegen stark verwunden sein. Das ist eine Voraussetzung dafür, dass der Flügel auch beim schlagdynamisch problematischen Aufschlag förderliche Luftkräfte, d. h. möglichst viel Auftrieb er-

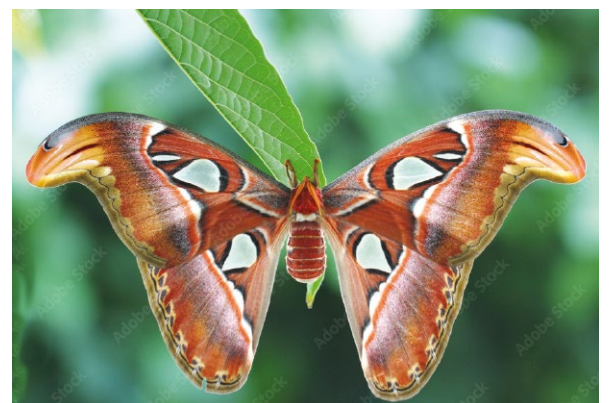


ABB. 12 Flügel eines Atlasspinners (*Attacus atlas*) mit Fortsätzen an den Spitzen. Die Schlangenkopf-ähnliche Zeichnung dient vermutlich der Abschreckung von Fressfeinden (Mimikri). Foto: iStock.

zeugt. Möglicherweise hängt die Flügelgeometrie auch mit dem „Gaukelflug“ zusammen, der den Tagfaltern eigen ist und der sie wohl vor Jägern schützen soll. Der erhöhte induzierte Widerstand der Vorwärtspeilung spielt wegen der geringen Re-Zahl hier keine große Rolle, da der Reibungswiderstand überwiegt.

Spitzer Flügelabschluss ohne Pfeilung (Typ C)

Spitz zulaufende Flügel ohne prononcierte Rückwärtspeilung, gelegentlich sogar mit Vorwärtspeilung, findet man bei manchen Vögeln, wie z. B. den Bienenfressern (*Merops apiaster*, Abbildung 13). Mit ihren spitz zulaufenden Flügelgeflossen können auch fliegende Fische beachtliche Strecken beim Gleiten über Wasser zurücklegen. Auch hier, im Bodeneffekt knapp über der Wasseroberfläche, wirkt sich die Zuspitzung durch die effektive Erhöhung der Streckung günstig aus. Der induzierte Widerstand spitz geformter Enden ist bei limitierter Spannweite und ohne Rückwärtspeilung allerdings etwas höher als bei der Ellipse (Tabelle 1). Wenn man das Massenträgheitsmoment bzw. das Wurzelbiegemoment als limitierende Bedingung ansetzt, kann – wie oben am Beispiel gezeigt wurde – durch Erhöhung der Spannweite der induzierte Widerstand reduziert werden. Damit wird dieser Nachteil kompensiert.

Rückwärtspeilung (Typ D und E)

Zurückgepeilte, spitze Flügelenden findet man z. B. bei Seevögeln wie Möwen und Albatrossen. Besonders ausgeprägt ist der gepfeilte, zugespitzte Außenflügel z. B. bei Fregattvögeln und Sturmtauchern. Der Widerstandsgewinn dieses Flügeltyps bezogen auf den induzierten Anteil liegt laut Messungen und Berechnungen von Zimmer [8] bei 5 bis 10 Prozent. Zusammen mit einer hohen Streckung des Flügels ergeben sich ► Gleitzahlen bis zu 18 wie z. B. beim Albatros (vergl. [2]). Hohe Gleitzahlen bedeuten große Streckengewinne, was z. B. dem Albatros bei der



ABB. 13 Bienenfresser (*Merops apiaster*) besitzen ein ausgeprägt zugespitztes Flügelende mit Vorwärtspeilung. Foto: iStock.



ABB. 14 Mauersegler (*Apus apus*) mit stark prolongiertem, zurückgepeiltem Außenflügel. Foto: iStock.

DAS MASSENTRÄGHEITSMOMENT I

Der Abstand r einer Masse m von einer Drehachse bestimmt das Massenträgheitsmoment I .

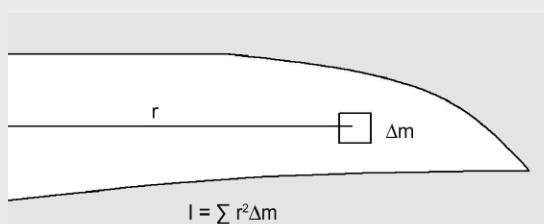
$$I = r^2 \cdot m$$

Das Gesamtträgheitsmoment erhält man durch Summation der Anteile $\Delta(m \cdot r^2)$ über die ganze Fläche.

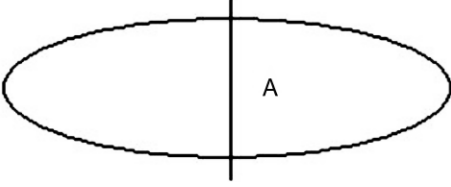
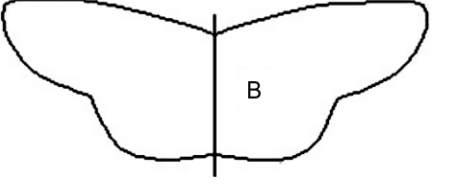
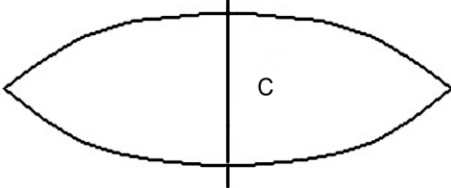
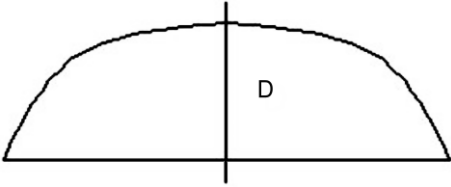
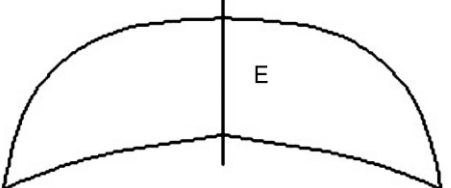
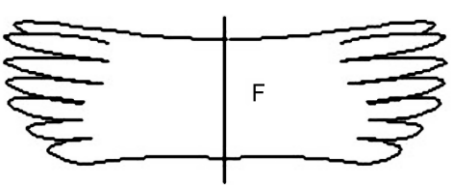
$$I = \sum r^2 \cdot \Delta m$$

Das Trägheitsmoment ist verantwortlich für die Trägheit einer rotierenden Masse. Ein hohes Trägheitsmoment erfordert eine große Kraft, um den Körper in Rotation zu versetzen. Besonders die von der Drehachse weit entfernten Massenanteile Δm erhöhen wegen des Abstandsquadrates r^2 das Trägheitsmoment.

Beispiel: Eine Eistanzerin verringert ihr Trägheitsmoment, indem sie die Arme und Beine an den Körper heranzieht, und rotiert dabei schneller. Streckt sie sie wieder aus, wird sie wieder langsamer. Für den Flügel bedeutet das: Ein leichter Außenflügel erleichtert Drehungen um alle Achsen und erhöht damit die Wendigkeit des Vogels.



TAB 1. FLÜGELFORMEN UND IHR EFFIZIENZFAKTOR k FÜR DEN INDUZIERTEN WIDERSTAND

Flügelumriss	Beispiele	k -Wert
	Netz-/Hautflügler (z. B. Libellen, Fliegen, Bienen usw.), Vögel (z. B. Elster, Specht, Eule, Kiebitz, Reiher)	1,0
	Schmetterlinge und andere Insekten	1,08
	Bienenfresser, fliegende Fische	1,03
	Tauben, Enten, Seevögel, Schwalben, Landsegler im Schnellflug	0,99
	Mauersegler, Seeschwalben, Fregattvögel, Falken	0,97
	Landsegler im Thermikflug (Störche, Adler, Geier, Kondore, Milane)	0,8 ¹⁾

¹⁾ Ergebnis aus Flugmessungen [5]. Fotos (von oben): Elster, Blauer Schreckenfaller, Bienenfresser, Mowe, Seeschwalbe, Rotmilan (iStock Foto, CanStock Foto, Jochen Fünfstück).

Futtersuche auf hoher See hilft, seinen Suchradius bis zu 1000 km und mehr auszudehnen. Nicht zuletzt verbessert die Pfeilform der Außenflügel die Richtungs- und die Längsstabilität. Aktive Korrekturen der Fluglage, die ja immer mit Widerstandszunahme einhergehen, sind weniger häufig nötig, was die Flugleistung zusätzlich verbessert.

Bei stärkerer Rückpfeilung des Außenflügels rückt das Prinzip des weit \blacktriangleright stromabwärts liegenden Randwirbels noch mehr in den Vordergrund, so dass die \blacktriangleright Induktionswirkung auf den Restflügel geringer ausfällt als bei moderater Pfeilung. Der induzierte Widerstand reduziert sich bei diesem Flügelumriss um rund 10 Prozent [8].



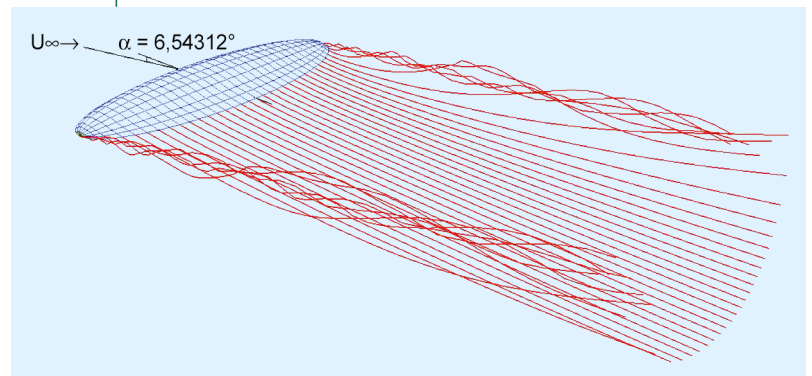
ABB. 15 Verteilung der Wirbelstärke hinter der Schwungfederkaskade eines Storches nach Windkanaluntersuchungen von [15]. Die Position der einzelnen Schwungfedern ist markiert. Von jeder Schwungfederspitze geht ein kleiner Randwirbel ab. Die Teilwirbel vereinigen sich nach zwei bis drei Spannweiten stromab wieder zu einem kompakten Wirbel. Foto: Institut für Aerodynamik, TU München.

Maximale Zurückpfeilung mit Zuspitzung des distalen Flügels findet man z. B. beim Mauersegler (*Apus apus*, Abbildung 14) bzw. dem sehr ähnlich aussehenden Fahlsegler (*Apus pallidus*). Diese Vögel verbringen ihr ganzes Leben überwiegend im Flug. Der sichelförmige Flügel mit der geringen Masse im Außenbereich gewährleistet auch eine extreme Wendigkeit beim Fang von Insekten. Auch Schwalben und Turmfalken (*Falco tinnunculus*) besitzen mit ihren spitzen, stark zurückgepfeilten Flügelenden eine hohe Wendigkeit, da das Massenträgheitsmoment trotz langer Außenflügel in Grenzen gehalten wird. Mehlschwalben zeigen mit ihren spitzen Flügeln eine erstaunliche Gleitflugfähigkeit. Oft werden bei der Insektenjagd mehrere Kreise ohne großen Höhenverlust im Gleitflug zurückgelegt.

Aufgefächerte, kaskadierte Flügelenden (Typ F)

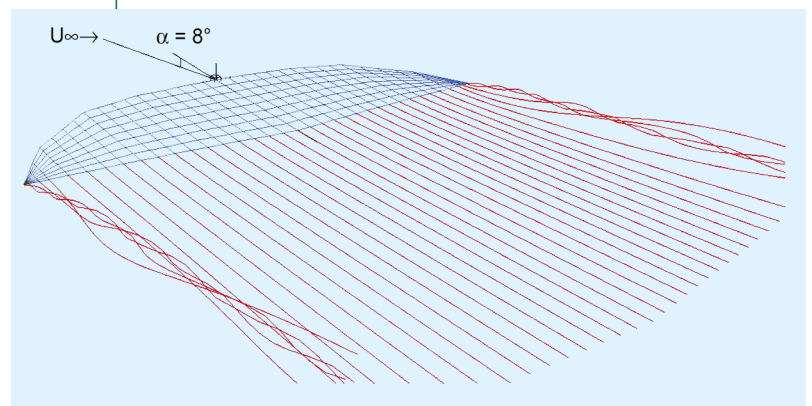
Die Auffächerung des Flügelendes im Gleit- bzw. Segelflug mittels höhengestaffelter (kaskadierter) Handschwungfedern findet man bei Landseglern wie Störchen (*Ciconia*), Milanen (*Milvus*), Geiern (*Gyps*) und Adlern (*Aquila*). Die migrierenden Arten legen beim Zug bis zu 10.000 km zurück und nutzen dabei meist thermische Aufwinde, Windscherungen, Wolkenaufwind und Hangaufwind entlang Gebirgsketten. Da thermische Aufwinde örtlich meist stark begrenzt sind, ist der Flügel für enges Kreisen ausgelegt. Das bedeutet, er muss viel Fläche bei einer begrenzten Spannweite besitzen. Die Streckung des Flügels Λ beträgt bei den Landseglern etwa 7, bei den Hochseeseglern dagegen bis zu 18. Da der induzierte Widerstand eines kurzen Flügels sehr hoch ist, stellt die Schwungfederkas-

ABB. 16 | RANDWIRBEL EINES ELLIPTISCHEN FLÜGELS



3D-Darstellung des Wirbelfeldes eines elliptischen Flügels. Im Nachlauf biegen immer mehr Wirbelfäden nach außen ab und vereinigen sich mit dem Randwirbel. Grafik: G. Ercolani.

ABB. 17 | RANDWIRBEL EINES GEPFEILTEN FLÜGELS



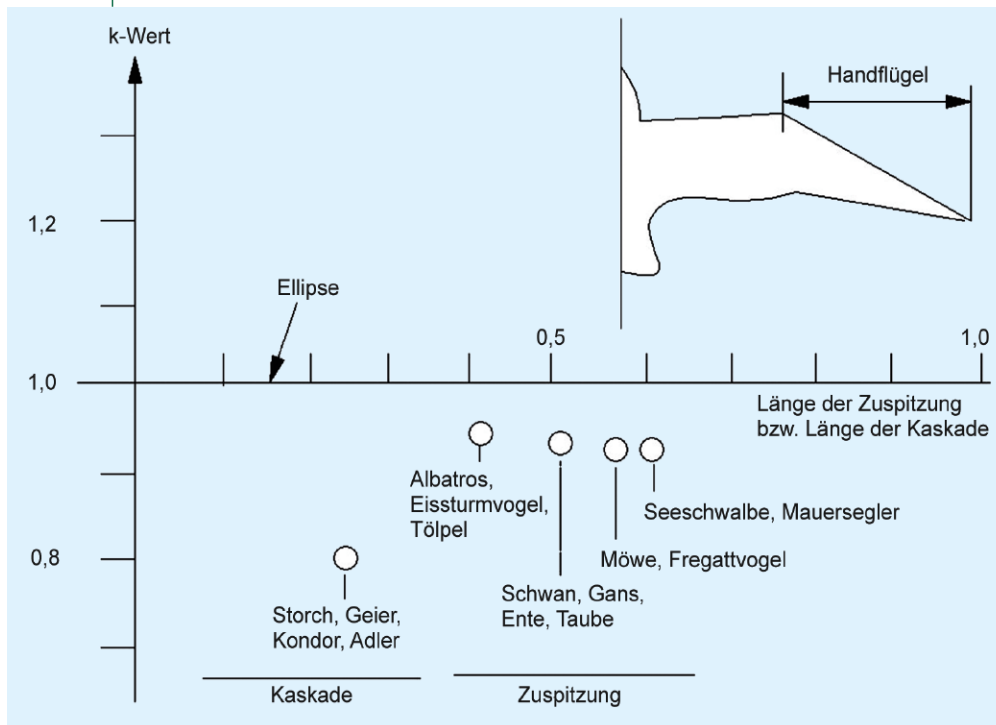
Wirbelnachlauf eines zurückgepfeilten Flügels (Typ D). Der Randwirbel ist hier deutlich schwächer ausgeprägt als bei der Ellipse. Dieser Flügeltyp zeigt mit $k = 0,97$ den geringsten induzierten Widerstand der berechneten Flügelformen. Grafik G. Ercolani.

kade einen Anpassungsvorteil dar. Nach Messungen an Störchen im freien Gleitflug [5] wird der induzierte Widerstand durch die Kaskadierung um mindestens 20 Prozent reduziert. Aerodynamische Berechnungen kommen zu einem ähnlichen Ergebnis [13]. Das Prinzip bei der Auffächerung lautet: Minimierung der Wirbelenergie. Von den wie kleine Tragflügel arbeitenden Schwungfedern geht jeweils ein kleiner Randwirbel ab. In der Summe wird ein energieärmeres Wirbelfeld erzeugt, als das bei einem geschlossenen Tragflügelende der Fall ist [14] (Abbildung 15). Des Weiteren liegt der Schwerpunkt der Wirbelstraße sehr weit außen bei ca. 90 Prozent der Halbspannweite [15], was auf einen geringen induzierten Widerstand hindeutet.

Berechnung für abstrahierte Flügelformen

Die Computersimulation mit dem Programm FLZ Vortex erfolgt nach dem Prinzip des Wirbelgitterverfahrens. Für die Berechnung des Wirbelfeldes wird der Flügel in einzelne

ABB. 18 | INDUZIERTER WIDERSTAND VON NATURFLÜGELFORMEN



Der Effizienzfaktor k für den induzierten Widerstand in Abhängigkeit von der Handflügelgröße [5, 8].

Elemente aufgeteilt. Je mehr Zellen, desto genauer wird die Berechnung. Hier wurde eine 36×8 Matrix (288 Elemente) verwendet. Alle Modellflügel wurden zum Zwecke der Vergleichbarkeit bei der Berechnung des induzierten Widerstandes auf eine Streckung von 4 normiert. Manche Flügel erscheinen deshalb stärker gedrunken als in der Natur.

Das Vortex-Programm berechnet für die von uns angenommenen, modellhaften Flügeltypen A-F den kompletten Nachlauf und den induzierten Widerstand. Die Ergebnisse der Simulation sind zahlenmäßig in Tabelle 1 und die grafischen Ergebnisse (exemplarisch) in den Abbildungen 16 und 17 dargestellt. Bezieht man die berechneten Widerstände F_{Wi} auf den induzierten Widerstand des Ellipsenflügels (F_{Wiell}), bekommt man einen Effizienzfaktor $k = F_{Wi}/F_{Wiell}$, $k = 1$ bedeutet, dass der induzierte Widerstand demjenigen der Ellipse (genauer der elliptischen Auftriebsverteilung) entspricht. Ein k -Wert unter 1,0 bedeutet einen geringeren Widerstand als derjenige der elliptischen Verteilung, ein größerer k -Wert einen größeren. Wie aus der Tabelle 1 hervorgeht, in der die berechneten k -Werte für die Modellflügel Typ A bis F zusammengefasst sind, zeigen zurückgepfeilte Flügelformen einen geringeren induzierten Widerstand.

Die Berechnungen an schematisierten Testflügeln dienen lediglich der Vergleichbarkeit. Reale Naturflügelformen berechnete der Aerodynamiker H. Zimmer im Rahmen seiner Dissertation mit Hilfe des Wirbelgitterverfahrens [8]. Die Ergebnisse für den Effizienzfaktor k in Abhängig-

keit von der Länge der Zuspitzung des Handflügels bzw. der Kaskade sind in Abbildung 18 dargestellt. Für die Schwungfederkaskade wurden die Messwerte von [5] herangezogen.

Einfluss der Zuspitzung beim Schlagflug

Beim Schlagflug herrschen andere Bedingungen als im Gleitflug. Der Auftrieb des Flügels bewegt sich beim Abschlag teilweise im oberen Grenzbereich, kurz bevor Strömungsablösung auftritt. Aerodynamisch gesehen ist auch hier eine Vergrößerung der Spannweite unter Einhaltung der zulässigen Biegemomente an der Flügelwurzel von Vorteil. Das heißt ein längerer Flügel erfasst ein größeres Luftvolumen und arbeitet deshalb effizienter. Der Widerstandsvorteil als Folge von Zuspitzung oder Kaskadierung des Außenflügels macht sich besonders beim Flügelabschlag bemerkbar, wo die Auftriebsbelastung maximal ist.

Zusammenfassung

Die Flugleistungen von Vögeln und Insekten hängen eng mit der Flügelform zusammen. Jeder auftriebsbelastete Flügel erzeugt Abwind, der unmittelbar auf ihn wirkt und der den induzierten Widerstand hervorruft. Die Evolution hat bestimmte Flügelformen hervorgebracht, die ein Minimum an induziertem Widerstand besitzen. Das verschafft z. B. den Vögeln Vorteile bei der Futtersuche, indem sich die Reichweite erhöht oder Migration ermöglicht wird. Seevögel zeichnen sich durch zugespitzte schlanke Flügel aus, während Landsegler dagegen breite Flügel mit Auffächerung der Handschwingen besitzen. Jede Flügelform scheint bezogen auf den Lebensraum des Individuums ein Optimum darzustellen. Mit den heutigen mathematischen Methoden können die Ergebnisse der Evolution voll bestätigt werden.

Summary

Wingtips – shape and significance

Flight performance of birds and insects is closely related to wing shape. Each lift-loaded wing generates a downwash that acts directly on it, causing induced drag. Evolution has produced specific wing shapes that have a minimum of induced drag. This provides advantages for the birds in foraging, for example, by increasing the range, or allows migration. Seabirds are characterized by pointed, slender wings, while land gliders have broad wings with fanned out hand wings. Each wing shape seems to be an optimum in relation to the habitat of the individual. With today's mathematical methods, the results of evolution can be fully confirmed.

Schlagworte:

Flugleistung, Flügel-Zuspitzung, Flügelpfeilung, induzierter Widerstand.

Nomenklatur:

F_A Auftrieb (N), F_W Widerstand (N), F_{Wi} induzierter Widerstand (N), A : Flächeninhalt (m^2), b : Spannweite (m), I : Massenträgheitsmoment ($kg \cdot m^2$), Λ : Streckung

Danksagung:

Die Autoren danken Herrn Dott. Informatiker G. Ercolani für die Durchführung der Berechnungen mit dem FLZ Vortex Programm.

GLOSSAR

Gleitzahl: Verhältnis der zurückgelegten Gleitflugstrecke zur Ausgangshöhe.

Induzierter Widerstand: Die Druckverhältnisse am Tragflügel erzeugen ein Wirbelfeld, das auf den Flügel zurückwirkt und dort Abwind erzeugt. Dies ist die Ursache für einen Zusatzwiderstand, den so genannten induzierten Widerstand (siehe auch Kasten S. 164).

Induktionswirkung: Fernwirkung eines Strömungsfeldes auf entferntere Bereiche. Luftwirbel können (ähnlich wie Magnetfelder) nach dem Gesetz von Biot-Savart in entfernteren Bereichen Geschwindigkeiten induzieren.

Effizienzfaktor k : Der k -Wert gibt an, wie das Verhältnis des induzierten Widerstandes bezogen auf die elliptische Auftriebsverteilung ist. $k < 1$ bedeutet einen kleineren, $k > 1$ einen größeren induzierten Widerstand als derjenige der elliptischen Auftriebsverteilung.

Kinematik: Das Gebiet der Mechanik, in dem die Bewegung von Körpern rein geometrisch mit den Größen Ort, Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung beschrieben wird (Definition nach Wikipedia).

Massenträgheitsmoment: Das Massenträgheitsmoment (siehe auch Kasten S. 167) setzt einer beschleunigten Drehbewegung einen Widerstand (Beschleunigungskraft) entgegen. Gleiches erfolgt bei einer beschleunigten geradlinigen Bewegung einer Masse (Newtonsches Gesetz).

Re-Zahl (Reynoldszahl): Sie entspricht dem Verhältnis Trägheitskraft/Reibungskraft. Verschiedene Strömungszustände mit gleicher Re-Zahl sind vergleichbar (Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz).

Rückwärts-/Vorwärtspfeilung: Verläuft das Flügelende schräg nach hinten, spricht man von Rückwärtspfeilung. Entsprechend verläuft bei Vorwärtspfeilung das Flügelende schräg nach vorn.

Streckung Λ : Verhältnis Spannweite b zu mittlerer Flügeltiefe. Für beliebige Flügelformen wird die Formel $\Lambda = b^2/A$, b : Spannweite (m), A Flügelfläche (m^2) verwendet.

stromabwärts, stromaufwärts: Punkt im Strömungsfeld hinter/vor dem Flügel.

Tragende Linie: Modellhaft kann man sich vorstellen, dass der Auftrieb eines Flügels entlang einer virtuellen Linie angreift: der tragenden Linie. Sie verläuft in 25 Prozent der Flügelhöhe.

Wurzelbiegemoment: Das an der Basis (Einspannstelle) eines Flügels vorhandene Biegemoment. Es entspricht der Summe aller Kräfte, multipliziert mit dem jeweiligen Abstand von der Einspannstelle.

Literatur

- [1] W. Fiedler et al. (2018). Die Vögel Mitteleuropas im Flug bestimmen. Quelle & Meyer, Wiebelsheim.
- [2] K. Herzog (1968). Anatomie und Flugbiologie der Vögel, G. Fischer, Stuttgart.
- [3] P. Wellenhofer (1983). Solnhofener Plattenkalk: Urvögel und Flugsaurier, Freunde des Museums Solnhofener Aktien-Verein e.V.
- [4] H. Eder (2017). Bionik der Flugfeder. Biol. Unserer Zeit 1/47, 54–59.
- [5] H. Eder H et al. (2015). Evaluation of aerodynamic parameters from infrared laser tracking of free-gliding white storks. J Ornithol 156, 667–677.
- [6] O. Lilienthal (1910). Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Oldenburg München und Berlin.
- [7] L. Prandtl (1933). Über Tragflügel kleinsten induzierten Widerstandes. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt Nr. 11(24).
- [8] H. Zimmer (1983). Die Aerodynamische Optimierung von Tragflügeln im Unterschallgeschwindigkeitsbereich und der Einfluss der Gestaltung der Flügelenden. Dissertation Institut für Aerodynamik und Gasdynamik Universität Stuttgart.
- [9] G. Rüppell (2003). Die Eroberung des Luftraumes. Biol. Unserer Zeit 4/33, 231–243.
- [10] W. Fiedler (2005). Ecomorphology of External Flight Apparatus of Blackcaps (*Sylvia atricapilla*) with Different Migration Behaviour. Ann. N. Y. Sci 1046, 253–263.
- [11] H. Eder et al. (2016). Das Geheimnis des Storchensflugs. Biol. Unserer Zeit 2/46, 106–112.
- [12] H. Eder (2019). Die Bionik der Schwungfederkaskade. Biol. Unserer Zeit 1/49, 68–72.
- [13] D. Hummel (1980). The aerodynamic characteristics of slotted wingtips in soaring birds. 17th Int. Ornithology Congress, Berlin.
- [14] U. Küppers, I. Rechenberg (1983). Randwirbelaufteilung durch aufgefächerte Flügelenden VDI Fortschrittsberichte Reihe 7, Nr. 81, ISSN 0341–1753.
- [15] X. Pascoe (2009). Nachlaufvermessungen eines Storchensflügels, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Aerodynamik und Fluidmechanik der TU München.

Verfasst von:



Dr. Heinrich Eder, Studium der Physik und Medizintechnik an der TU München, Wissenschaftliches Interesse: Bionik des Fliegens, Muskelkraftflug. Seit 2009 Zusammenarbeit mit dem Max Planck Institut für Ornithologie (jetzt: MPI of Animal Behavior), Radolfzell.



Prof. Dr. Werner Nachtigall, Studium der Biologie und Physik mit Schwerpunkt Aerodynamik an der LMU und der TU München. Leitete das Zoologische Institut der Universität des Saarlands 1968 bis 1992. Forschungsschwerpunkt Bewegungsphysiologie.

Korrespondenz:

Dr. Heinrich Eder
Am Stadtpark 43
81243 München
Email: Eder-h@arcor.de



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

